

温泉地帯における地すべり抑止工の設計

Design of Steel-Pile Prevention Works for Landslide at Hot-Spring Area

吉田 道彦*
Michihiko Yoshida

古賀 司郎**
Shiro Koga

野田 浩次***
Koji Noda

岡井 崇彦****
Takahiko Okai

要 約

当該地の基礎地盤は温泉作用によって変質した変朽安山岩である。また、地表面付近には温泉余土が分布する。本工事はこのような温泉地帯の傾斜地盤上に約40mの高盛土を行う道路建設工事である。盛土材はトンネル掘削によって発生するズリを使用する。基礎地盤の挙動を把握するため、動態観測を実施しながら盛立てを行っていた。約10m盛土した段階において基礎地盤に地すべり挙動が現れたため、抜本的な地すべり対策工を検討することとなった。対策工は、鋼管杭による抑止工を採用した。また、当該地のような温泉地帯においては、温泉作用による地盤の強度低下、温泉地すべりの発生に加えて構造物の腐食対策が大きな問題として挙げられる。本工事では鋼管杭の腐食対策として、FRPライニングによる防食を実施した。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 工事概要
- §3. 地形・地質の概要
- §4. 地すべり発生までの経緯
- §5. 地すべり対策工の設計
- §6. 鋼管杭の防食
- §7. おわりに

原工事は、別府市より大分市へ向かう延長1755m区間の工事である。

本文で取扱う地すべりは、当該工区の盛土部の基礎地

§1. はじめに

大分自動車道は、長崎市を起点に、長崎・佐賀・福岡・大分各県を横断して大分市まで達する九州横断自動車道の一部であり、鳥栖ジャンクションから大分県内の日田市・別府市・大分市を結ぶ高速道路である。この内、乙

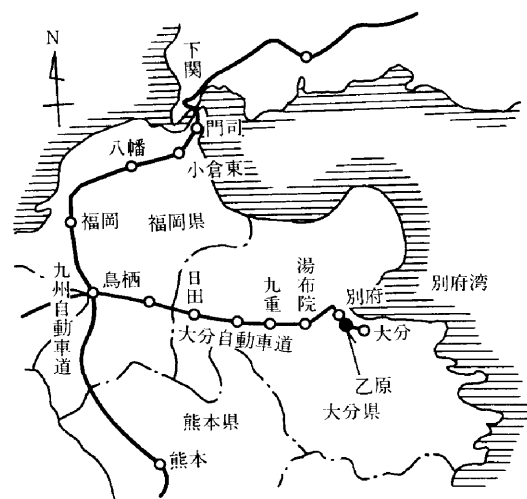


Fig.1 位置図

*九州(支)乙原(出)所長

**九州(支)乙原(出)係長

***土木設計部課長

****土木設計部

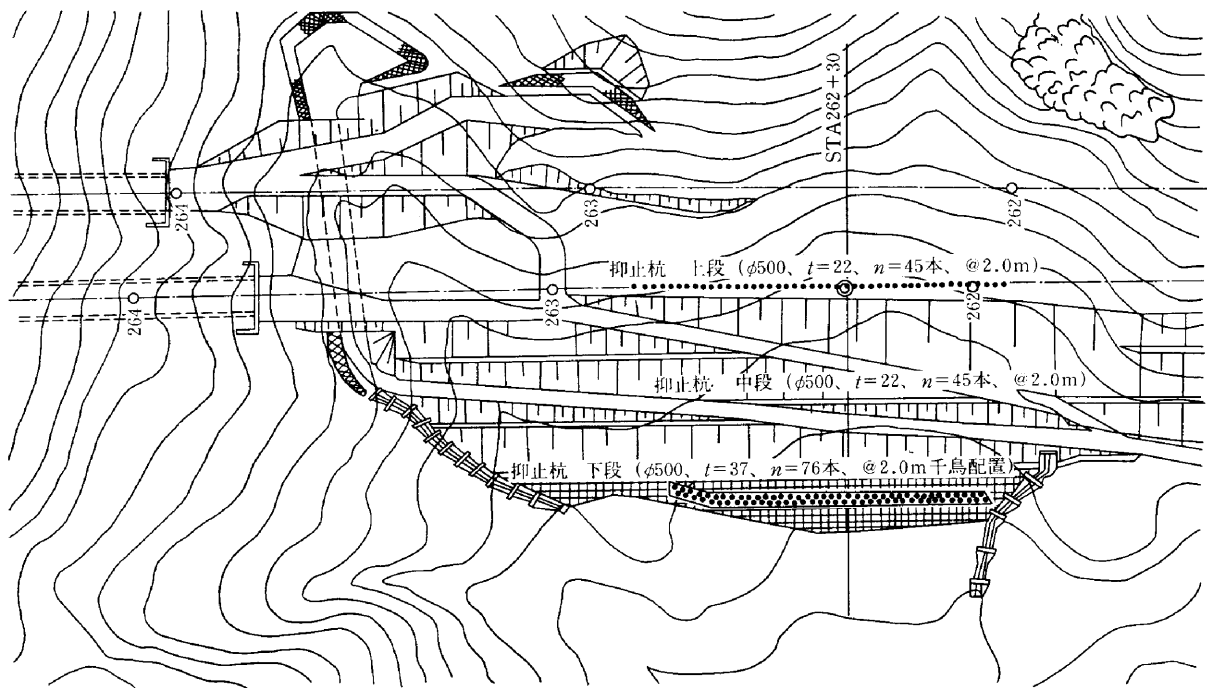


Fig.2 平面図

盤に発生した。当該地点では、トンネル掘削によって発生するズリを用いて、最終形状で $H=40\text{m}$ の高盛土が計画されている。本工事が傾斜地盤上の盛土施工であること、基礎地盤が強い風化作用を受けた変朽安山岩であり、軟弱な粘性土層となっていることなどから、当該盛土部では計画当初よりすべり破壊の危険性が懸念されていた。

盛土基礎地盤の挙動と施工中の安全を確認するため、動態観測を行いながら施工を進めていたところ、1段盛土を完了した段階（盛土高 $H=10\text{m}$ ）において基礎地盤の変状が顕在化してきた。そこで、抜本的な地すべり対策工を検討することとなった。

本文では、当該地において実施した地すべり対策工の

設計手法、および抑止工として採用した鋼管杭のFRPによる防食について報告する。

§ 2. 工事概要

乙原工事の内、当該地区の盛土工事は、山腹斜面裾部の凹部にトンネル掘削によって発生したズリを盛土するものである。盛土高は、高い部分 (STA262+30付近) で $H=40\text{m}$ に達する。Fig. 2 に工事区域の平面図、Fig. 3 に断面図を示す。

当社施工分は、この内、暫定盛土となる $H=29\text{m}$ である。

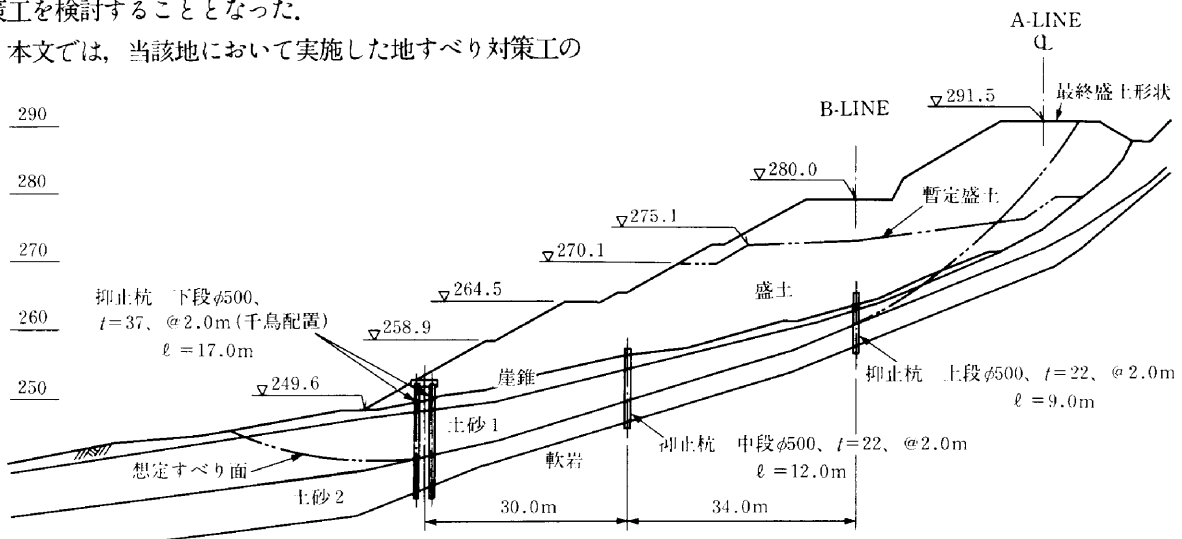


Fig.3 断面図 (STA262+30)

当該盛土工事は、当初橋梁案等も考えられたが、温泉地帯であるために生ずる構造物の腐食対策の問題、およびトンネル掘削土の土捨場確保の問題等を解消する案として決定されたものである。

§ 3. 地形・地質の概要¹⁾

別府湾周辺の地質は、主として新第三系および第四系の若い地層群とこれらの地層の堆積期を通じて活動した由布・鶴見・国東・九重などの大量の火山噴出物によって特徴づけられる。このように若く固結度の低い堆積物、崩壊性の火山噴出物、また、しばしば急峻な火山地形、さらに別府市周辺において温泉作用による粘土化が著しいなど別府湾周辺一帯に地すべり崩壊の素因が内包されている。

当該地区を含めた周辺の基盤は、観海寺付近に広く分布する変朽安山岩および安山岩である。変朽安山岩は、安山岩が熱水変質したもので、粘土化作用が著しく表層付近では灰白色に呈する。また、変朽安山岩は容易に風化しやすい岩質で、露頭においては土砂状となる。

当該盛土施工位置の所々には、火山ガスの噴出箇所や温泉水の湧出箇所があり、その付近にはこれらの作用によって岩石が変質した温泉余土（温泉粘土）が分布する。温泉余土では、変質条件に応じて種々の粘土鉱物が生成される。別府地域の温泉は酸性泉であり、この地域の温

泉余土の主要粘土鉱物はカオリナイトである²⁾。したがって、当該地の工事では酸性環境下における構造物の腐食対策および地盤の軟弱性が問題となる。

基盤岩を覆う表層は、当該地区においては、崖錐堆積物であり、未固結の礫混り粘性土・砂礫を主体とする。

地すべりの検討に当たり、対象地盤を土質および N 値の分布状態から土砂1層（崖錐層を含む）、土砂2層、風化部の3層に区分した（Fig. 3 参照）。

§ 4. 地すべり発生までの経緯

4-1 事前検討

当該地点における盛土工事は、最終形状で $H \approx 40\text{m}$ の高盛土となること、傾斜地盤上の盛土であること、盛土基礎地盤が強い風化作用を受けた変朽安山岩であり、軟弱な粘土層となっていることなど、形状および地形・地質的に不利な条件下での施工となることが予想された。

このため、事前に計画断面（最終盛土形状）において地すべり解析および各種対策工の検討がなされた。地すべり解析では、当初採取試料の三軸CU試験（圧密非排水試験）結果を用いた長期安定に対する検討が行われていた。しかし、今回の盛土施工がトンネルズリによる急速盛土であること、および基礎地盤に粘性土層が含まれる

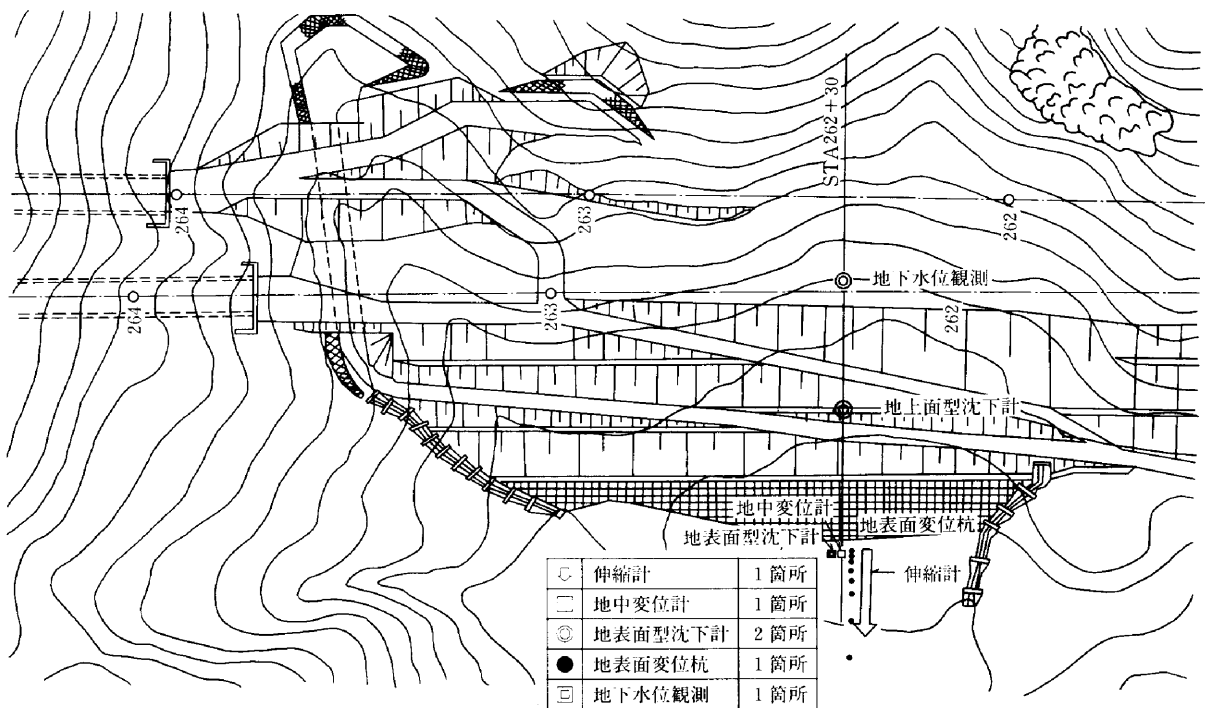


Fig.4 観測機器配置図

ことなどを考慮すると、完成直後の安定検討も必要となる。そこで、新たに試料を採取し三軸 UU 試験（非圧密非排水試験）を行い、その結果を用いて短期安定に対する検討を追加した。検討の結果、当該断面は長期・短期ともに対策工なしでは所定の安全率を確保できないとの結論を得た。そこで、各種抑制工、抑止工の検討を行い、対策工として地下水位低下工法を採用し、設計段階での不確定要素を補う手段として動態観測を実施しながら施工を進めるという基本方針に沿って盛土を開始した。

4-2 動態観測および結果

前述の基本方針に従い、検討対象である STA262+30 断面では、施工時の盛土の挙動を監視する目的で Fig. 4 に示した項目の動態観測を実施した。伸縮計および地中変位計（傾斜計）の計測結果を Fig. 5, 6 に示す。

伸縮計の計測結果は、盛立てが $H=5.5\text{m}$ に達した頃から盛土側方地盤に圧縮の傾向が現れ、 $H=10\text{m}$ の時点で圧縮量は約 8mm となった。その後、盛立てを停止したにもかかわらず、変位は収束傾向を示すに至らなかった。

地中変位計の測定結果によると、 $GL-9\text{m}$ 付近を境界として、それより深部と浅部とで明瞭な差異が生じていた。このことは、区間変位量の分布を見るとさらに明瞭であり、 $GL-9\text{m}$ 付近に変位が集中していることがわかった。この位置での平均せん断ひずみは約 3% とな

り、当該地点での土質試験結果との対比から判断してほぼ弾性限界に近いひずみが発生しているものと推定された。また、地中変位計の計測結果も伸縮計のそれと同様、盛立て停止中においても変位の増加が認められた。

以上のように、盛土基礎地盤における変状が顕在化したため、盛立てを中断し、今後の対策を検討することとなった。

§5. 地すべり対策工の設計

5-1 現況における地盤挙動の推定

前述した計測結果から、当該地点における地盤挙動に関して次のように考えた。

- ① 盛土施工を中断し、盛土荷重の増加がないにもかかわらず、盛土基礎地盤には継続的な変位が生じており、地盤は極めて不安定な状態にある。
- ② $GL-9\text{m}$ 付近にかなり明瞭なせん断型の変位を生じており、この位置ですべり面が形成されている可能性が高い。

したがって、当該地点は地形的な特徴にも表れているように元来地すべりの素因を有しており、盛土施工に伴う荷重増加によって土塊の安定が失われ、地すべり運動が発生したものと推定される。

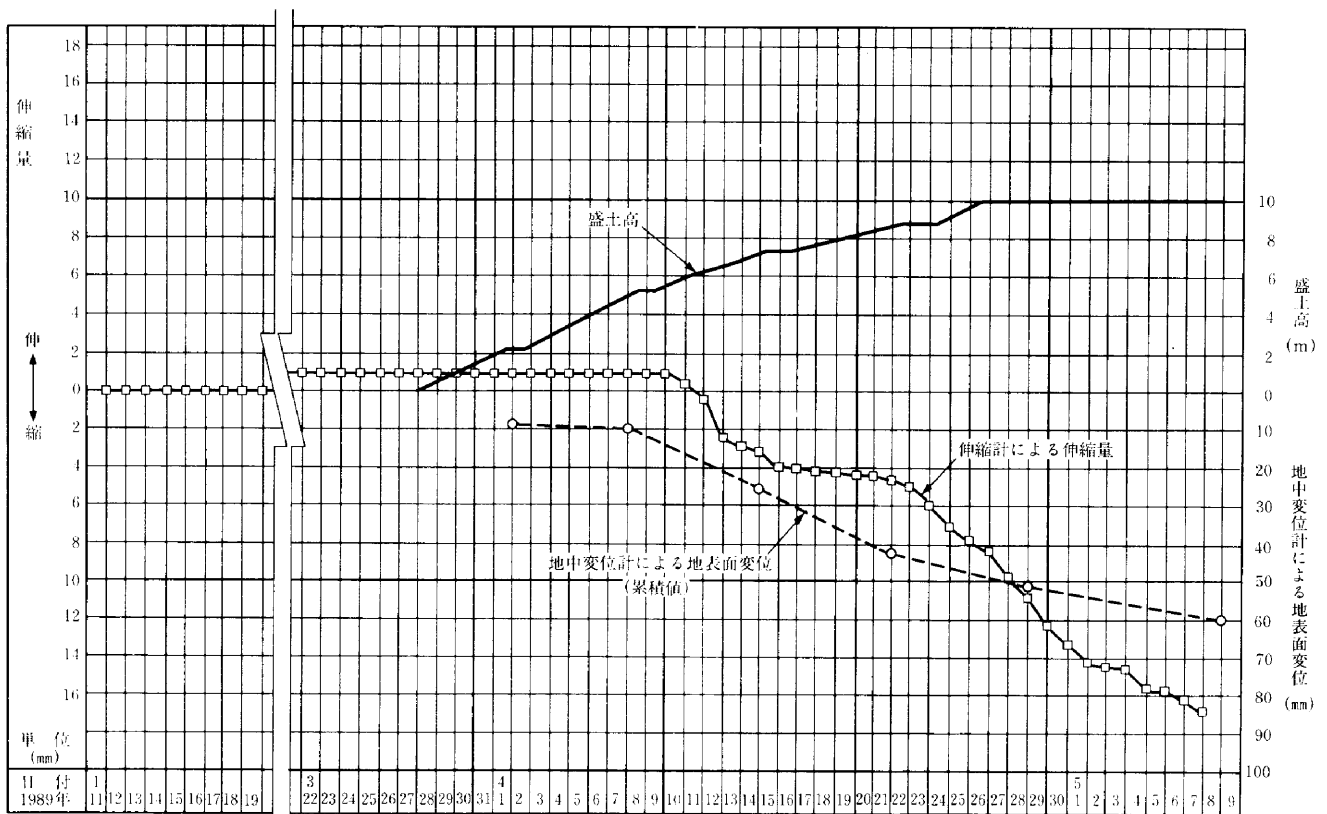


Fig.5 伸縮計計測結果

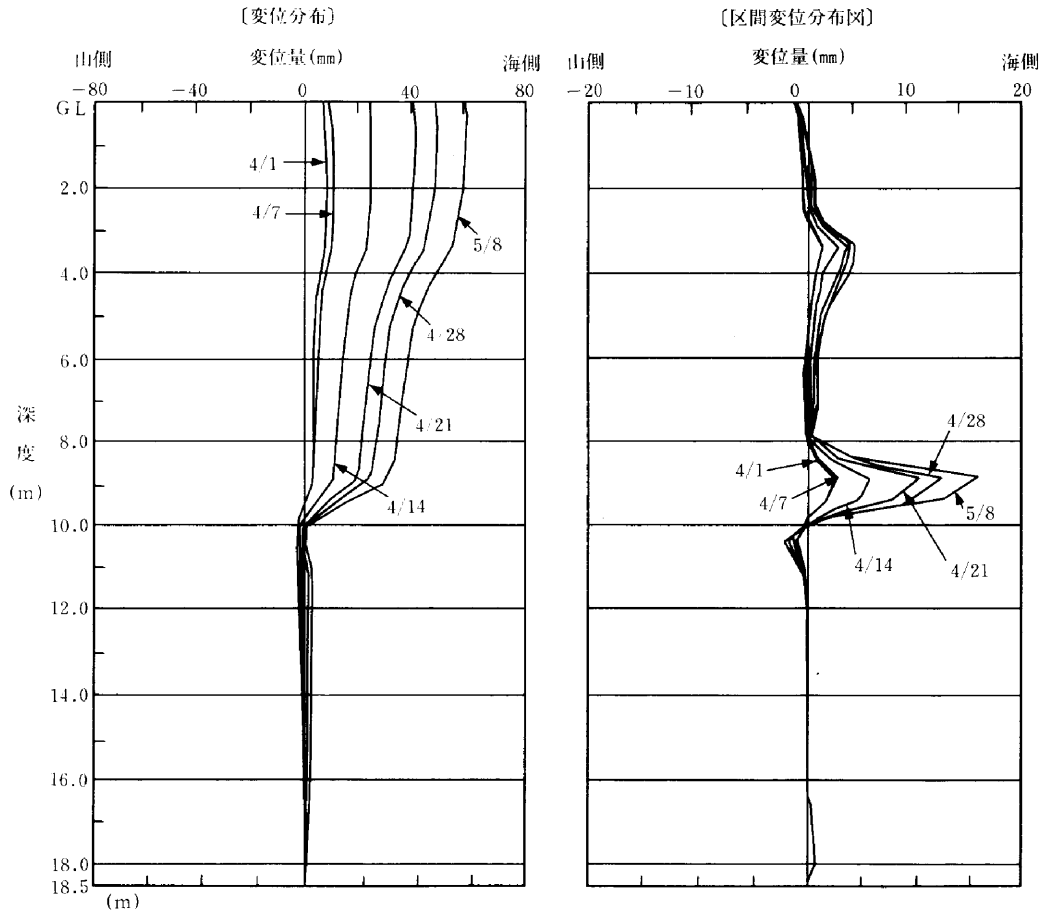


Fig.6 地中変位分布図

そこで、すべり面が形成されていると推定される土砂1層（崖錐層を含む）を対象に安定解析を行った。当該すべりでは前述したすべり変位が計測されており、かつそれが収束していない。また法面下方に稼働中の地熱発電所があり、大規模な地すべりに発展した場合、影響が大きなものとなる。これらの点を考慮して現状におけるすべり安全率を $F_s=0.95$ とした。逆算法により対象土層の強度定数を算定した結果を Table 1 に示す。また、その時のすべり面を Fig. 7 に示す。

Table 1 に示した強度定数は、土質試験結果から得られた強度定数と非常に近い値であり、盛土基礎地盤の土砂1層と土砂2層の境界には、せん断破壊によってすべり面が形成されているものと推定された。

したがって、盛立てを再開するためには、地すべり対策工を施工する必要があるとの結論を得た。

5-2 対策工の設計

対策工の設計は Fig. 8 に示すフローに従って行った。

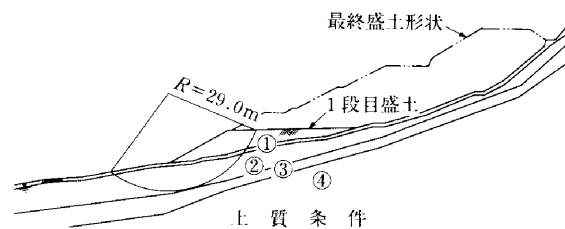
(1) 必要抑止力の算定

対策工を設計するための必要抑止力の算定は、盛土最終形状に対して行った。また、すべり面が発生すると考えられる土砂1層の強度定数は、以下の理由により、有

Table 1 対象土層の強度定数

	c (tf/m ²)	ϕ (deg)
全応力法	3.8 (3.2)	0 (0)
有効応力法	2.0 (2.0)	9.7 (15.0)

()内数値は、土質試験結果である。



土質条件

層番号	土質名	飽和重量 (tf/m ²)	湿潤重量 (tf/m ²)	粘着力 (tf/m ²)	内部摩擦角 (deg)
①	盛土	1.80	1.80	1.0	30.0
②	土砂1	1.60	1.60	2.0	9.7
③	土砂2	1.80	1.80	9.2	0.0
④	軟岩	1.90	1.90	10.0	30.0

計算結果

すべり	起動モーメント (tf・m/m)	抵抗モーメント (tf・m/m)	半径 (m)	安全率 F_s
最小	4710	4470	29.0	0.95

Fig.7 安定解析結果(1段盛土)

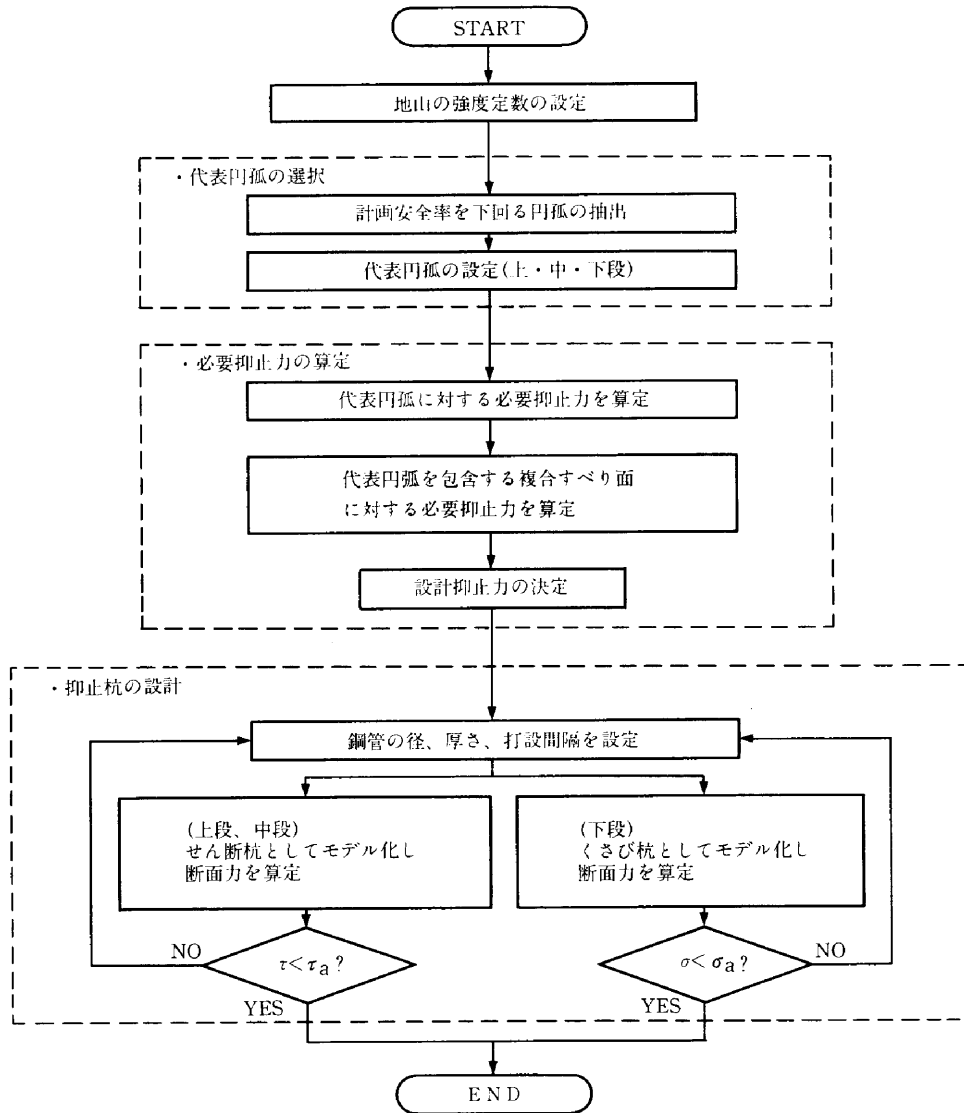


Fig.8 抑止工設計フロー

効応力法で逆算した値を使用することとした。

- ① 対象土層内には、地下水排除工を施工済みである。
- ② 当該地区の温泉余土の圧密特性(c_v)は、圧密降伏応力付近で600~1800cm²/dayと大きな値を示し、圧密速度が速いと予想される。
- ③ 盛土荷重によるせん断抵抗の増分を無視することは、経済性を考慮した場合、不合理である。

安定解析は、円弧すべり面と複合すべり面の2ケースについて行った。円弧すべり解析の結果では、各計算格子点(円弧の中心)における安全率が計画安全率を下回る円弧が非常に多く存在することが判明した。このことは、検討断面における法長が非常に長く、すべり面がいたる所で発生する可能性を示している。しかし、これらの円弧はある程度パターン化しているため、ほとんどの円弧を包絡するようそれらの代表的な円弧を選択して検討することが得策であると判断し、代表円弧を3種類決

定した。

また、完成形状においては、下部の円弧すべりが発生すると、その上部のすべりが連続的に誘発され全体すべりに発展することが十分予想される。したがって、各部分におけるすべりを考慮すると同時に、全体の安定についても検討を行う必要がある。そこで、代表円弧を包絡する複合すべり面を仮定し検討を行った。

安定解析結果を Fig. 9 に示す。

必要抑止力は、各すべりに対する計画安全率(F_{sp})を1.20として算定した。これをもとに、設計抑止力を前述2種類のすべりに対して安全となるよう決定した。必要抑止力の算定結果および設計抑止力を Table 2 に示す。

(2) 抑止杭の設計

本件の設計抑止力は、468tf/m(4590kN/m)と非常に大きく、抑止規模、用地条件等を勘案した結果、地すべり対策工として抑止杭工を採用することとした。杭種

Table 2 必要抑止力および設計抑止力 (tf/m)

対象すべり面	必要抑止力	設計抑止力
上部すべり	166	177
中部すべり	170	181
下部すべり	110	110
全体すべり	467	468

計算結果

すべり	起動モーメント (tf・m/m)	抵抗モーメント (tf・m/m)	半径 (m)	安全率 F_s
上部	51500	49000	76.0	0.95
中部	24200	19900	53.0	0.82
下部	14700	12200	48.5	0.85
最小	6130	4870	27.0	0.79

計算結果

すべり	起動力 (tf/m)	抵抗力 (tf/m)	安全率 F_s
複合	1059	798	0.75

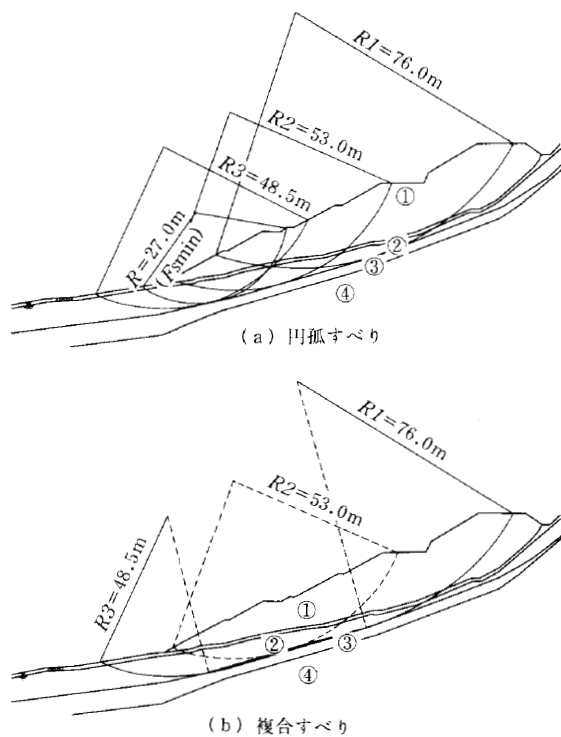


Fig.9 安定解析結果(最終盛土)

および工法は、後述する有毒な腐食性ガス対策、および盛立てを再開するために急速施工が必要なこと、打込み杭とした場合、打撃によって生じる振動が地すべりブロックの動きを刺激する可能性が大きく危険であることなどを考慮し、厚肉鋼管杭を用いた建込み杭とした。

抑止杭は、代表的な各円弧すべりを抑止すると同時に全体のすべりに抵抗するよう配置した。抑止杭の挙動は、地すべりブロック内におけるその設置位置によって異なる

り、その設計手法も挙動に対応したものでなければならない。しかし、抑止杭の規模は、その設計手法によって大きく影響を受けるため、設計手法の決定は重要なポイントである。今回の場合は、上段・中段の各杭をせん断杭として、下段杭を以下の理由によりモーメント杭（くさび杭）として設計した (Fig. 3 参照)。

- ① 下段杭設置位置は現状において地すべりの兆候が認められている。
- ② 軟弱層が厚く、杭前面に大きな受働抵抗(杭反力)を期待することができない。
- ③ 盛土法面下方に稼働中の地熱発電所があり、地すべり発生時の影響が大きい。

§ 6. 鋼管杭の防食

6-1 防食の必要性

当該地は前述のとおり温泉地であり、基礎地盤は熱水、蒸気、硫気等の温泉作用を受け、温泉余土が分布する。このような場所において土木構造物を建設する場合、粘土化による地盤強度の低下、地すべりの発生とともに酸性化に伴うコンクリートおよび鋼材の腐食が問題点として挙げられる。温泉余土ではしばしば pH1.5~2 までの低い値が報告され²⁾、当該地の土質試験結果においても試料土に蒸留水を添加した懸濁液から pH2.4~3.7 という値が測定された。また、当該地盤においては非常に強い腐食力を持つ硫化水素(H₂S)が確認されている。コンクリート構造物の防食対策としては、コンクリートによる増厚工法、防食材によるライニングを行う防食工法などがあり、それらを用いた構造物が当該地近くに施工されている³⁾。

鋼材の腐食に対しては、通常の場合、腐食代を設計時に考慮することによって対処している。特に腐食速度が速いとされる港湾構造物の飛まつ帯における鋼材の腐食速度の参考値は0.3mm/年となっている⁴⁾が、当該値のそれは2mm/年程度と非常に大きな値が予想された。

当該地すべり対策工としては、鋼管杭による抑止工を立案した。したがって、その腐食対策は大きな問題となった。

当該地すべりは盛土荷重による増加荷重によって引き起こされたものと推定され、地すべり荷重は完成後においても継続的に作用すると考えられる。このような場合、抑止杭の許容応力度は長期に対する値を用いて設計する必要がある。つまり、設計時に考慮すべき抑止杭の耐用年数は、盛土の耐用年数と同じと考えなければならない。

Table 3 各積層ごとの目的と使用材料

名 称	目 的	使 用 材 料	備 考
プ ラ イ マ ー	鋼管杭とFRPとの付着促進	防 食 樹 脂 RF-1	
チョップドストランド層	ガラス繊維(不織布)使用による基層材(補強材)	防 食 樹 脂 RF-1 チョップドストランドマット	防食層
サーフェイス層	ガラス繊維(連続単繊維)使用による表面用材	防 食 樹 脂 RF-1 サーフェイスマット	防食層
ト ッ プ コ ー ト	仕 上 げ 材	防 食 樹 脂 RF-1 顔 料 (トナー)	

この耐用年数に先の腐食速度を乗じたものを杭の腐食代とすると、それ自体で非常に大きな値となり鋼管杭の内厚としては非現実的なものとなる。

そこで、今回の抑止杭については腐食対策として鋼管杭に防食加工を施し、設計時には腐食代を考慮しないという考え方を採用した。防食加工を行った場合、杭の打ち込みによる貫入は防食層の被覆を傷付け、はく離を生じる可能性があり、この点からも建込み杭とする必要があった。

6-2 FRPによる防食加工

鋼管杭の防食には、抑止杭を盛土と同様永久構造物として適したものとするために、耐腐食性に加えて温泉地であることから高温に対する確実性も要求される。そこで、今回の地すべり抑止杭には、FRPライニングによる

Table 4 樹脂配合表(RF-1を100とした時の比率)

使用箇所	樹脂名	工場施工部	現場施工部	備 考
プ ラ イ マ ー 防 食 層	RF-1	100.0	100.0	主 剤
	硬化剤	1.5	2.0	硬化用添加剤
	促進剤	1.5	2.0	硬化用添加剤
ト ッ プ コ ー ト	RF-1	100.0	100.0	主 剤
	硬化剤	1.5	2.0	硬化用添加剤
	促進剤	1.5	2.0	硬化用添加剤
	トナー	10.0	10.0	仕上げ用顔料
	パラフィン	5.0	5.0	仕上げ安定剤

防食が最も適していると考え、本工法を提案、採用した。なお、抑止杭にFRPによる防食を行ったのは当社では初めてである。

FRPとは Fiberglass Reinforced Plastics (強化プラスチック)の略称であり、ガラス繊維を補強材とした熱硬化性樹脂(主に不飽和ポリエステル樹脂、エポキシ樹脂)積層品の総称である。

(1) FRP 防食層の構造

FRPによる防食工法には、ガラス繊維を防食樹脂で固めた半割管状のものを接合する方法もある。しかし、杭の変形が大きくなる可能性があるため、その接合部が

弱部となることが懸念される。腐食力の強い温泉ガスであるため、少しの傷でも避けなければならない。そこで今回は、防食層を多層に重ね塗りする工法を採用した。

FRP防食加工の構造は、大分県別府土木事務所にて実施された試験施工および施工実績に準ずるものとし、使用箇所により以下の3種類とした。

- ・抑止杭底部1m ————— 5プライ
- ・抑止杭現場接合部 ————— 3プライ
- ・標準部(上記以外) ————— 2プライ

標準部の施工構造図を Fig. 10 に示す。なお、チョップドストランド層1層を1プライと称している。各積層の目的と使用材料を Table 3 に示す。

防食樹脂は単体のみでは硬化作用はなく、添加剤を加えることによって硬化し、機能を発揮する。添加剤としては、①硬化剤 ②硬化遅延剤 ③促進剤の3種類がある。これらの内、当工事は冬期の施工となるため①と③を用い、Table 4 に示す樹脂配合とした。

FRP防食加工の膜厚管理は、最低膜厚で管理した。管理膜厚値を Table 5 に示す。

Table 5 管理膜厚値(単位: mm)

	設計膜厚	管理目標
		最低膜厚
2プライ	2.7	1.8
3プライ	3.8	2.9
5プライ	6.0	5.1

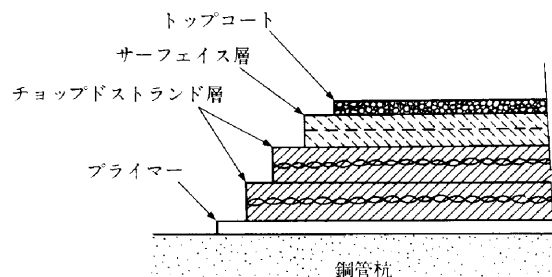


Fig.10 標準部の施工構造図

Table 6 ロス率実験結果

実験結果集計表				
実験概要	対象杭 No.	NaC-13, C-14, C-15, C-52 計4本		
	塗布面積	2プライ:93.006㎡ 5プライ:7.068㎡		
	設計樹脂量	エポラックRF-1 305.4kgf		
	使用樹脂量	エポラックRF-1 535.0kgf		
実験結果	測定項目		ロス率(%)	備考
	① 気化によるロス率		2.0	
	② 発熱損失によるロス率		X 1	
	③ 垂れ落ちによるロス率		2.7	実験値
	④ ローラー洗浄によるロス率		10.5	—
	⑤ 塗布缶の中での固形及び残分によるロス率		14.7	—
	⑥ その他		X 2	
全体ロス率			75.2	実験値

ここに、ロス率 = $\frac{\text{ロス量}}{\text{設計量}} \times 100$

X 1, X 2 : 要因別ロス率算出不可能

(2) 防食樹脂のロスについて

FRPライニングに用いる樹脂は、硬化剤を混入・攪拌後、硬化時間内に塗布しなければならないこと、ローラーを用いて気泡を残さないように何度も浸透させなければならないことから、通常の塗装と違い、相当量のロスが発生する。考えられるロスは以下の通りである。

- ① 気化
- ② 発熱損量
- ③ 垂れ落ち
- ④ ローラー洗浄 (5 kgf (49N) 塗布ごとに洗浄)
- ⑤ 塗装缶の中での固形および残分
- ⑥ その他

FRPライニングのロス率を算出する目的で行った実験結果を Table 6 に示す。今回の実験結果のロス率 75.2%は、他工事の実績の平均値 (90~95%) より低い値であった。しかし、このロス率の高さには、事実驚いた次第である。

§ 7. おわりに

温泉地すべり地帯における盛土施工に伴って発生した地すべりの抑止対策について報告した。本事例の場合、動態観測によって地すべりの発生が確認され、本文では述べなかったが追加抑止工の検討時においても動態観測結果が重要な位置を占めた。また、すべり初期の挙動解析結果は土質試験結果から得られた強度定数とよく一致しており、すべり解析の中でもまれなケースであったと言えよう。しかし、当該地盤の特殊性から生じたと考えられるすべりの発展を初期段階に予測できなかったこと

は残念である。また、盛土荷重による地すべりの発生ということで、動態観測によって地盤の変状が確認されてから抑止工を施工するという、後手に回った対応策となり工期に与える影響が非常に大きい結果となった。

H.2. 11現在、追加対策工である抑止杭工、および置換工を鋭意施工中である。

今後、今回と同種の地盤条件下で行う工事では、動態観測の重要性を再度確認し、その計画・実施・結果評価には十分な注意を払うべきである。また、今回、地すべり抑止杭の防食に FRP を用いたことは、当社では初めての試みであり、同様の工事の参考になれば幸いである。

最後に、本工事の設計・施工にあたり御指導、御尽力いただいた日本道路公団大分工事事務所の方々はじめ、関係各位に深甚の謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 日本道路公団福岡建設局大分工事事務所：南立石地区地すべり調査及び解析結果総括報告書、昭和60年3月。
- 2) 落合英俊、松下博通、江頭和彦、一瀬久光：温泉余土と基礎工、土と基礎、Vol.36, No. 3, pp.61~66, 1988.
- 3) 伊藤野彦、一瀬久光：温泉地帯における RC アーチ橋の設計と施工—大分自動車道・別府橋—、コンクリート工学、Vol.25, No.12, pp.12~21, 1987.
- 4) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説改訂版 (上巻)、pp.239~241, 平成元年2月。
- 5) 日本道路公団福岡建設局大分工事事務所：鋼管杭の防蝕、平成元年。